

# 基于采样二通道不可分小波的多光谱图像融合

刘 斌<sup>1</sup>, 祝 青<sup>1</sup>, 胡福强<sup>1</sup>, 刘维杰<sup>2</sup>

(1. 湖北大学数学与计算机科学学院, 湖北武汉 430062; 2. 武汉大学计算机学院, 湖北武汉 430072)

**摘 要:** 针对基于非下采样不可分小波图像融合方法空间分辨率不高、基于张量积小波融合方法会出现方块效应的不足, 提出了一种基于伸缩矩阵为 $[1, 1; 1, -1]$ 的二通道采样不可分小波的多光谱图像和全色图像融合方法. 利用矩阵扩充方法, 构造了一组新的不可分低通滤波器和高通滤波器组, 利用所设计滤波器组分别对多光谱图像的亮度分量和全色图像作下采样的多尺度不可分小波分解, 分别对分解后的低频子图像和高频子图像按不同的融合规则进行融合. 实验结果表明, 其保持光谱信息的能力和保持空间分辨率信息的能力比基于 IHS 变换融合方法、基于 DWT 的融合方法、基于 IHS-DWT 的融合方法、基于 IHS-Contourlet 变换的融合方法、基于 IHS-Curvelet 变换的融合方法、SRF 方法都强, 与基于非下采样的二通道不可分正交小波和不可分双正交小波融合方法相比, 该方法能保持较好的整体光谱信息和较高的空间分辨率信息.

**关键词:** 图像融合; 二通道抽样不可分小波; 多光谱图像; 全色图像

**中图分类号:** TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013)04-0710-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.04.014

## Multi-Spectral Image Fusion Method Based on Sampled Two Channel Non-Separable Wavelets

LIU Bin<sup>1</sup>, ZHU Qing<sup>1</sup>, HU Fu-qiang<sup>1</sup>, LIU Wei-jie<sup>2</sup>

(1. School of Mathematics and Computer Science, Hubei University, Wuhan, Hubei 430062, China;

2. Computer School, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

**Abstract:** In order to solve the problems that the image fusion method based on separable discrete wavelet transform has block effect in the fused image and the spatial resolution is lower in the fusion result image of nonsubsampling non-separable wavelet transform, a new multispectral image fusion method based on sampled two channel non-separable wavelets is proposed. The filter banks relating to this kind of wavelet are constructed. The multi-resolution decompositions of the intensity of the multispectral image and panchromatic image are performed in sampled mode using the constructed filter bank. The low frequency and high frequency coefficients are fused by different fusion rules. The experiment results show that this method has good visual effect. The fusion performance outperforms the IHS fusion method, the fusion method based on DWT, IHS-DWT, IHS-Contourlet transform, IHS-Curvelet transform and SRF in preserving spectral quality and high spatial resolution information. When compared with the fusion method based on nonsubsampling two-channel non-separable wavelet, the proposed method has been observed to have higher spatial resolution and good global spectral information.

**Key words:** image fusion; two-channel sampled non-separable wavelets; multispectral image; panchromatic image

## 1 引言

多光谱 (Multi-Spectral, MS) 图像与高分辨率全色 (Panchromatic, PAN) 图像的融合是将具有好的光谱信息但分辨率较低的图像与具有高空间分辨率全色图像进行整合, 生成一幅既具有好的光谱信息又具有高的分辨率的图像. 它是目前遥感图像融合热点, 并有着广泛的应用<sup>[1,2]</sup>.

目前关于多光谱图像与高分辨率图像的融合方法主要有 IHS (Hue, Intensity and Saturation) 变换方法<sup>[3]</sup>、主成分分析法 (Principal Component Analysis, PCA)<sup>[4]</sup>、基于离散小波变换 (Discrete Wavelet Transform, DWT) 的融合方法<sup>[5]</sup>. 这些方法都存在一些不足. IHS 变换方法能得到高分辨率的图像, 但融合结果图像的光谱信息损失严重. PCA 方法适合于多光谱图像的所有波段, 虽然增加了融合结果图像的空间表现力, 但其光谱分辨力受到

很大影响,其融合的运算量较大.基于张量积离散小波变换方法所得融合结果图像有好的融合效果,但它只强调水平方向和垂直方向的高频分量,在对图像进行分解和重构时进行了水平方向和垂直方向的抽样,使得融合结果图像中有方块效应.基于上述问题,Zhang 等人把 IHS 变换具有较好的空间分辨率和小波变换能获得较好的光谱信息这两个互补的优点有机结合起来,提出了一种结合 IHS 变换和小波变换的多光谱图像融合方法<sup>[6]</sup>,获得了较好的融合效果,融合结果图像既具有较好的光谱信息,也具有较高的空间分辨率.但由于所建议的融合方法采用的是基于下二抽样的张量积小波变换,不具备时不变性,也使得融合结果图像不可避免地产生了人工痕迹和方块效应.还有很多学者提出了把 IHS 变换与加性小波相结合的融合方法<sup>[7]</sup>,基于提升小波的融合方法<sup>[8]</sup>,基于第一代 curvelet、第二代 curvelet 和 contourlet 变换的融合方法<sup>[9~12]</sup>及其与 IHS 相结合的融合方法等.但这些方法中目前所使用的小波都是张量积小波.图像的稀疏表示是近年来发展起来的图像处理的有效工具,它也被应用于多光谱图像的融合中<sup>[13,14]</sup>.

不可分小波特别是二通道不可分小波在图像融合中有着良好的特性.张量积小波是二维小波的特殊情况,二维不可分小波是近年来发展起来的一类新的小波<sup>[15]</sup>,它是二维小波的更一般的情况,图像是二维信号,张量积小波是用点信息去逼近二维图像,而图像是二维曲面—只有使用真正的二维小波才能完全更好地逼近它,另外,相对于张量积小波而言它有很多好的特点,如可同时具有紧支撑、正交性和对称性<sup>[16]</sup>,在对图像进行分解和重构时,能获得具有较高空间分辨率的图像<sup>[17]</sup>,克服了张量积离散小波变换不能获得高空间分辨率图像的不足.我们研究小组研究了基于四通道、三通道、二通道不可分小波滤波器组的构造,并把它们应用于图像融合中,获得了较好的融合效果.在这三种方式中,二通道不可分小波有其明显的特色.其一,众所周知,一般景象的图像信息多集中在二维频谱的所谓“钻石型”区域中,采用五株型采样能较好地提取该区域内的信息,二通道不可分小波完全满足此要求.其二,二通道小波只有两个通道,在对图像进行分解与重构时只需做两个通道的滤波和采样<sup>[18]</sup>,相对于四、三通道不可分小波,它能节约大量的运算量.

与非采样方式下的小波分解相比,采样方式下的小波分解才是小波多尺度分析的本质特点.在我们先前研究的基于四通道、三通道、二通道不可分小波的图像融合方法中,采用的都是非下采样的分解方式,这种方式有明显的不足,其一,没有真正体现小波的抽样特性和分频特性,采用“钻石型”五株采样能较好地提取

图像目标区域内的有用信息;其二,在对图像进行多尺度分解与重构时,由于每层的图像与原图像的大小基本相同,因而处理时的运算量很大,不适合实时图像处理.目前还未见基于采样方式下的二、三通道不可分小波的图像融合方法研究.因此,为了获得更好的能保持多光谱信息和高分辨率信息的图像融合方法,减少融合过程的运算量,本文提出一种基于采样二通道不可分小波的多光谱图像与高分辨率图像的融合方法.

## 2 二维二通道不可分小波滤波器组与采样方式

### 2.1 二维小波变换与离散栅格的采样方式

设  $\mathbf{x} = (x_1, x_2)^T \in \mathbb{R}^2$ ,  $\psi(\mathbf{x}) \in L^2(\mathbb{R}^2)$  为二维母小波函数,  $\mathbf{M}$  为  $2 \times 2$  抽样矩阵. 设  $\mathbf{b} = (b_1, b_2)^T \in \mathbb{R}^2$  为平移向量, 令:  $\psi_{\mathbf{M}, \mathbf{b}}(\mathbf{x}) = \frac{1}{|\det(\mathbf{M})|} \psi[\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{b})]$  为二维母小波的伸缩平移形式, 若  $f(x_1, x_2) \in L^2(\mathbb{R}^2)$ , 则其二维小波变换定义为

$$\mathbf{WT}_f(\mathbf{M}, \mathbf{b}) = \langle f(\mathbf{x}), \psi_{\mathbf{M}, \mathbf{b}}(\mathbf{x}) \rangle = \iint_{\mathbb{R}^2} f(\mathbf{x}) \psi_{\mathbf{M}, \mathbf{b}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x}$$

上式中,  $\mathbf{M}$  表示小波分解后的抽样(downsampling)方式和重构时的插值(upsampling)方式, 因此  $\mathbf{M}$  也称为采样矩阵, 当  $\mathbf{M} = [1, 1; 1, -1]$  时, 表示对离散栅格进行梅花型采样<sup>[15]</sup>, 此时矩阵  $\mathbf{M}$  的行列式的绝对值为 2, 表示上述小波变换有 2 个通道, 1 个低通通道和 1 个高通通道, 相应地有一个尺度函数和一个小波函数, 从而有 1 个低通滤波器和 1 个高通滤波器, 此时的尺度函数和小波函数都不能分解为一维的尺度函数和一维的小波函数的张量积, 是梅花形的不可分小波.

当采样矩阵为  $[1, 1; 1, -1]$  时, 小波分解对平面离散栅格的抽样可由如下两步骤完成:

第一步, 按  $\mathbf{n}' = \mathbf{M}\mathbf{n}$

$$(\mathbf{n}' = (n'_1, n'_2)^T, \mathbf{n} = (n_1, n_2)^T), \text{ 即按 } \begin{cases} n'_1 = n_1 + n_2, \\ n'_2 = n_1 - n_2. \end{cases}$$

方式进行坐标变换, 变换前后点坐标如图 1(a)-图 1(b)所示.

第二步, 对第一步中变换后的像素点进行抽样, 抽样方式有奇抽样和偶抽样. 图 1(b)-图 1(c)列出的是偶抽样的情形.

小波变换重构时的插值方式与上述过程相反.

### 2.2 图像在抽样方式下的多尺度分解与重构

记小波低通滤波器为  $\mathbf{H}_0 = \{h_0(k)\}_{k \in \mathbb{Z}^2}$ , 高通滤波器为  $\mathbf{H}_1 = \{h_1(k)\}_{k \in \mathbb{Z}^2}$ , 根据图 1 的坐标变换与抽样方式, 当抽样矩阵为  $\mathbf{M} = ([1, 1; 1, -1])$  时, 其图像的多尺度分解与重构可分别用图 2 和图 3 表示, 图 2 描述的是分解过程, 图 3 描述的是重构过程, 分解过程由两个

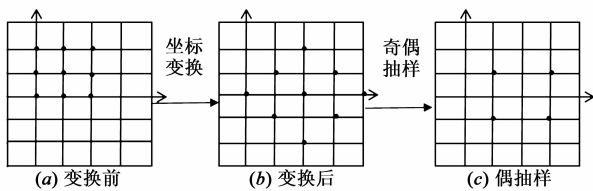


图1 二通道图像的坐标变换与抽样

并行的过程组成:其一,低通滤波  $H_0$ 、坐标变换和奇抽样(或偶抽样),其中,  $\downarrow M(E)$  表示坐标变换和偶(Even)抽样(如图1),  $\downarrow M(O)$  表示坐标变换与奇(Odd)抽样,经过此过程后,得到  $AE_j$  和  $AO_j$  两个低频子图像;其二,高通滤波  $H_1$ 、坐标变换和奇抽样(或偶抽样),经过此过程后,得到  $DE_j$  和  $DO_j$  两个高频子图像. 重构过程与分解过程相反,其中,  $\uparrow M(E)$  和  $\uparrow M(O)$  分别表示如图1所示的逆过程,即坐标变换和偶插值、坐标变换与奇插值,  $H_0^*$ 、 $H_1^*$  分别为与  $H_0$ 、 $H_1$  相对应的二通道小波重构低通滤波器和高通滤波器. 图2和图3只给出了一层分解、重构过程,实际上还可以进行多层小波分解(对  $AE_j$  和  $AO_j$  两个低频子图进行分解)与重构. 经过多层分解后,第  $j$  层含有  $2^j$  个低频子图像和  $2^j$  个高频子图像.

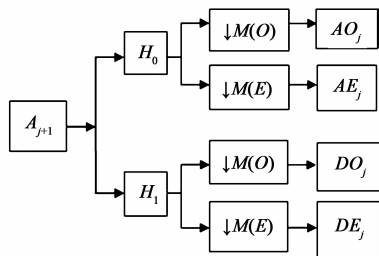


图2 图像的二通道小波分解

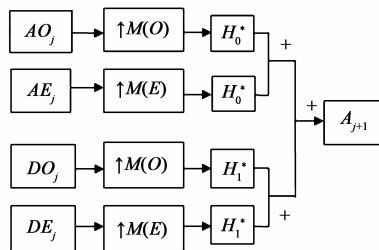


图3 图像的二通道小波重构

这种二通道不可分小波的抽样分解与不抽样的方式下的分解有本质的区别,它所进行的是梅花型抽样,能使得分解之后的图像的信息都集中在所谓的“钻石型”区域中,更能好地提取图像的有用信息.

### 2.3 二维二通道不可分小波滤波器组构造

从以上二通道小波多尺度分解与重构过程可以看出,小波分解的实质是近似分量图像分别在低通滤波器和高通滤波器的作用下,分解出低频成份和高频成份;小波重构的实质是下一层的低频成份和高频成份分别在重构低通滤波器和重构高通滤波器的作用下,

把所得的滤波结果相加得到上一层的近似分量. 其对小波分解和重构的过程不涉及到尺度函数和小波的具体形式,因此在诸如图像融合等实际应用的问题中,我们主要关心的是如何构造尺度低通滤波器和小波高通滤波器.

按照文献[18,19],我们设计了多组具有紧支撑、正交性的小波滤波器组. 这里给出一组滤波器的时域形式如下:

$$H_0 = \begin{pmatrix} 0.308134 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.453634 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.395234 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.157002 \end{pmatrix},$$

$$H_1 = \begin{pmatrix} -0.157002 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.148638 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.613774 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.308134 \end{pmatrix} \quad (1)$$

此滤波器组是不可分的,不能分解为两个一维小波滤波器的张量积,因而它是二维二通道不可分小波滤波器组.

### 3 融合算法

第一步:对全色图像 PAN 图像和多光谱图像 MS 进行配准.

第二步:对多光谱图像 MS 进行 IHS 变换<sup>[3]</sup>,得  $I$ 、 $H$  和  $S$  分量.

第三步:对全色图像 PAN 的亮度和多光谱图像 MS 的亮度成份  $I$  进行直方图匹配,得新的全色图像  $P'$ .

第四步:对多光谱图像的亮度分量  $I$  和全色图像  $P'$  进行融合,得亮度图像  $I'$ .

分别对图像  $I$  和  $P'$  按图1的方式进行二通道小波逐级分解. 用第2节构造的2个  $4 \times 4$  的滤波器分别对参加融合的两幅图像进行分解,然后对滤波结果低频子图像、高频子图像分别按矩阵  $M$  的抽样方式进行梅花型抽样,即按图1的方式,分别对滤波后的低、高频子图像进行坐标变换,然后分别对低、高频子图像进行奇抽样和偶抽样,得到相应的抽样后的奇、偶低频子图像和奇、偶高频子图像.

对分解后的奇、偶低频子图像和奇、偶高频子图像分别进行融合:

低频系数体现的是图像的近似信息,即图像中灰度值变化不大的地方,在基于小波分解的图像融合方法中,一般取两幅图像分解后的低频系数的加权平均作为融合图像的低频,根据第2节的二通道抽样小波分解理论知,一幅图像作  $L$  层分解后的最高层(最低空间分辨率层)含有  $2^L$  个低频抽样子图像,其中奇、偶抽样

子图像各占一半,设多光谱图像亮度分量  $I$  分解后的最高层的各低频分量为  $IA_i^L (i = 1, 2, \dots, 2^L)$ , 高分辨率全色图像  $P'$  分解后的最高层各低频分量为  $P'A_i^L (i = 1, 2, \dots, 2^L)$ , 其中,  $L$  为图像分解层数, 则融合后的最高层各低频分量  $FA_i^L$  为:

$$FA_i^L = t \times IA_i^L + (1 - t) \times P'A_i^L (i = 1, 2, \dots, 2^L)$$

研究发现,若  $t$  值越大,最后融合结果图像的光谱信息越好,否则,最后融合结果图像的空间分辨率越高.基于此规律,为了使结果图像既能保持好的光谱信息又具有较高的空间分辨率,我们取  $t = 1/2$ ,对分解后的奇、偶低频子图像均采用取平均值的方式进行融合.

图像作不可分小波分解后的高频系数体现的是图像的细节信息,高频系数越大,图像在相应位置的变化量越大,从而前景的值和背景的值相差较大,相应区域的对比度越大,图像越清晰,融合结果图像的空间分辨率越高,因此,我们对高频图像采用系数绝对值取大的融合规则.即全色图像  $P'$  分解后的各级奇、偶高频分量和多光谱图像亮度分量  $I$  分解后的相应奇、偶高频分量按绝对值取大的规则进行融合.本文中我们对奇、偶抽样高频子图像采用相同的融合规则.设  $ID_i^j$ 、 $PD_i^j$  分别表示  $I$  分量和全色图像  $P'$  分解后的第  $j$  层的第  $i$  个抽样高频子图像,设融合的亮度图像  $F$  的第  $j$  层的第  $i$  个抽样高频子图像为  $FD_i^j$ , 则:

各抽样高频子图的融合规则为:

$$FD_i^j = \begin{cases} ID_i^j & \text{abs}(ID_i^j) \geq \text{abs}(PD_i^j) \\ PD_i^j & \text{abs}(ID_i^j) < \text{abs}(PD_i^j) \end{cases} \\ (j = 1, 2, \dots, L; i = 1, 2, \dots, 2^j) \quad (2)$$

其中,  $L$  为图像分解层数.

对融合后的低频子图像和高频子图像按图 3 的方式进行逆变换,得到重构图像  $F$ .

第五步:对图像  $F$ 、 $H$  和  $S$  进行 IHS 逆变换,形成融合后的多光谱图像.

## 4 实验结果的评价与分析

### 4.1 实验结果

为了验证上述方法的可行性,我们进行了大量的实验研究,得到了一致的结论.本文主要对其中的一对图像的融合结果进行视觉效果和量化指标进行分析.如图 4 所示,图 4(a)(b)中每幅图像的大小为  $512 \times 512$ ,多波段图像所选择的是 B2(绿光波段)、B3(红光波段)和 B4(近红外)三波段合成的图像.这是一幅火灾的场景,图中右上角等处火焰还正在燃烧,而图中的左下角偏上方等地方火焰已熄灭,留下了燃烧的痕迹,火焰和燃烧后的痕迹是要通过颜色表示的.

图 5(i)为本文建议融合方法的融合结果图像.为

了体现本文方法的融合效果,我们把它与基于 IHS 变换融合方法<sup>[3]</sup>、基于稀疏表示的图像融合方法(Sparse Representation and Fusion, SRF)<sup>[14]</sup>、基于 DWT 变换的融合方法<sup>[5]</sup>、基于 IHS-DWT 变换的融合方法<sup>[6]</sup>、基于 IHS-Contourlet 的融合方法<sup>[11]</sup>、基于 IHS-Curvelet 的融合方法<sup>[10]</sup>分别作对比研究,后四种方法的融合规则与本文融合规则相同.另外,为了看出本文方法与伸缩矩阵相同( $[1, 1; 1, -1]$ )的其它二通道不可分小波融合方法区别,我们把它与基于 IHS 变换和非下抽样的二通道不可分正交小波相结合的融合方法(IHS and Two-Channel Nonsampled Orthogonal Nonseparable Wavelet, IHS-TCNONW)<sup>[15]</sup>、基于 IHS 变换和非下抽样的二通道不可分双正交小波融合方法(IHS and Two-Channel Nonsampled Biorthogonal Nonseparable Wavelet, IHS-TCNBONW)<sup>[20]</sup>作比较.图 5(a)~(h)分别是 LISS-3 图像分别使用这八种方法得到的融合结果图像,所采用的张量积小波为 Daubechies 系列小波中的 db2 小波.本文建议方法、基于 DWT 融合方法、基于 IHS-DWT、基于 IHS-Contourlet、基于非下采样不可分小波的融合方法的小波分解层数均为 3.

比较上述九种方法融合结果图像的视觉效果,基于 IHS 变换的融合方法(图 5(a))虽然空间分辨率较好,但其颜色偏深,光谱信息较差.基于 DWT 的方法融合结果图像(图 5(b))的光谱信息扭曲也较严重,更多地保持了原全色图像的颜色信息,且在山脊等处有明显的方块效应(图像放大后更明显).基于 IHS-DWT 融合方法(图 5(c))虽然光谱信息较好,但在山脊等边缘点处方块效应仍然存在.基于 IHS-Contourlet 的融合方法、SRF 方法以及基于 IHS-Curvelet 的融合方法(图 5(d)~(e),(h))都能较好地保持原图像的光谱信息和空间分辨率信息,但与本文方法相比,颜色略偏深,细节信息与原 PAN 图像的相似程度不如本文方法高.基于 IHS-TCNONW 和 IHS-TCNBONW 的融合方法(图 5(f)—5(g))融合视觉效果较相似,其光谱信息较好,但结果图像的空间分辨率不高.本文所建议方法(图 5(i))能保持较好的光谱信息,右上角处的火焰的颜色和左下角偏上方的燃烧痕迹的颜色很自然;同时,结果图像清晰,有较高的空间分辨率,与全色图像有相同的分辨率;图像自然,没有方块效应和人工痕迹.

### 4.2 融合结果客观性能分析

为了衡量融合图像保持原 MS 图像的光谱信息的能力,我们采用偏差指数(Bias)、标准差(Standard Deviation, SD)、原多光谱图像的 R、G、B 通道与融合结果多光谱图像的 R、G、B 通道的相关系数(Correlation Coefficient, CC)、相对平均光谱误差指数(Relative Average Spectral Error, RASE)、相对整体维数综

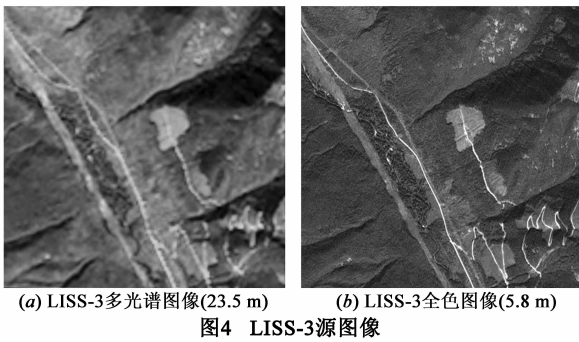


图4 LISS-3源图像

合误差(其意为: Relative Global Dimensional Synthesis Error, ERGAS)去衡量光谱信息的保持程度<sup>[9]</sup>, 其中 BIAS、SD、CC 用于评价结果图像与原图像各像素间的光谱信息的平均差异, 其值越小, 光谱信息平均差异越小, 光谱信息越好. 而 RASE、ERGAS 用于评价图像的整体光谱信息保持程度, 其值越小, 图像的整体光谱信息保持越好.

为了衡量融合结果图像保持原 PAN 图像的空间分辨率信息程度, 采用熵(Entropy)、sCC 以衡量融合结果图像的空间分辨率信息保持程度<sup>[9]</sup>, 其值越大, 说明融合结果图像保持原 PAN 高分辨率信息越好.

为了衡量融合结果图像保持原 MS 图像的结构特征信息, 我们选用 FSIM 指标去衡量融合结构信息保持程度<sup>[21]</sup>, 其值越大, 说明融合结果图像与原图像在结构特征上相似程度越大.

表 1、表 2 是各种不同融合方法的客观性能指标. 从表中可以看出, 本文建议融合方法的 BIAS、SD 指标的值比 IHS 变换融合方法、DWT 融合方法、IHS-DWT 融合方法、IHS-Contourlet 融合方法、IHS-Curvelet 融合方法、SRF 方法的值都小, 其 CC 的值比上述六种方法的值都大, 说明本文方法融合结果图像与原多光谱图像的各像素的光谱信息的平均差异比这五种方法都小; 从表 1、表 2 还可以看出, 本文方法的 RASE、ERGAS 的值比其它八种方法的值都小, 说明本文方法保持原 MS 图像的整体光谱信息的能力最强; 另外, 本文方法的 Entropy 和 sCC 的值比其它八种融合方法的相应值都大, 说明本文融合方法保持原 PAN 图像的空间分辨率的能力最强; 从表 1、表 2 还可以看出, 本文建议融合方法的 FSIM 指标的值比 IHS 变换融合方法、DWT 融合方法、IHS-DWT 融合方法、IHS-Contourlet 融合方法、IHS-Curvelet 融合方法、SRF 方法的值都大, 说明本文方法在保持原图像结构特征的相似性方面比上述六种方法都强.

本文方法在保持原 MS 图像各像素的平均光谱信息上比 IHS-TCNONW 和 IHS-TCNBONW(从表 2 可看出这两种融合方法的性能相近)方法差, 这是由于这两种方法采用非下采样的原因, 分解和重构时低频系数值

较大, 使得结果图像光谱信息偏好, 这也反映出此类方法的空间分辨率偏低, 这一点从融合结果图像的视觉也可以看出; 另外, 从表 2 也可看出, 本文方法在保持结构特征相似性方面也比上述两种方法弱, 这也是由于非下采样的缘故, 不做抽样的小波变换都具有时不变性, 因而具有线性相位, 重构时边缘位置不发生偏移, 从而能较好地保持结构信息. 反之, 也可以看出 IHS-TCNONW 和 IHS-TCNBONW 方法的不足: (1) 结果图像的空间分辨率较低; (2) 融合时要耗费更多的运算量(不抽样的缘故).

综上所述, 本文建议方法在保持原图像的高空间分辨率信息和整体光谱信息上是最好的.

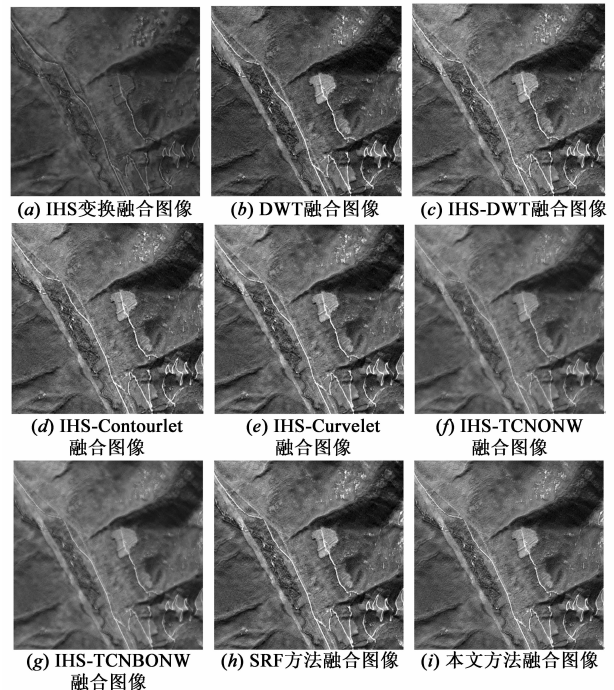


图5 LISS-3多光谱图像与全色图像的融合

## 5 结论

提出了一种基于伸缩矩阵为 $[1, 1; 1, -1]$ 的二通道采样不可分小波多光谱图像和全色图像的融合方法. 从融合的视觉判读效果看, 所建议的方法有好的视觉效果, 融合结果图像清晰, 能保持较好的光谱信息和高分辨率信息. 从客观性能指标看, 该方法保持原多光谱图像的光谱信息和全色图像的空间分辨信息的能力比采用相同融合算法的基于 IHS 变换的融合方法、基于 DWT 的融合方法、基于 IHS-DWT 的融合方法、基于 IHS-Contourlet 变换的融合方法、基于 IHS-Curvelet 变换的融合方法及 SRF 方法都强; 与基于非下采样的二通道不可分正交小波和不可分双正交小波融合方法相比, 该方法能保持较好的整体光谱信息和较高的空间分辨率信息, 有较强的适用范围, 可适合于多种多光谱图像

和全色图像的融合.

表 1 LISS-3 融合图像的各项性能指标

	IHS 融合方法			DWT 融合方法			IHS-DWT 融合方法			IHS-Contourlet 方法		
	R	G	B	R	G	B	R	G	B	R	G	B
BIAS	33.29	33.33	33.26	18.61	28.05	16.55	16.22	16.82	16.60	16.36	16.97	16.76
SD	41.79	42.54	42.48	25.28	34.17	23.07	22.48	23.30	23.11	22.64	23.49	23.31
RASE		49.36			18.3329			2.1950			2.3470	
ERGAS		14.00			3.4445			0.5082			0.5480	
CC	0.8646	0.7119	0.7287	0.8715	0.8118	0.8454	0.9035	0.8567	0.8456	0.9024	0.8550	0.8438
Entropy		6.7218			7.2544			7.4401			7.4392	
sCC	0.9105	0.9449	0.9713	0.9368	0.9694	0.9525	0.9347	0.9630	0.9550	0.9416	0.9710	0.9633
FSIM		0.7525			0.8072			0.8100			0.8032	

表 2 LISS-3 融合图像的各项性能指标

	IHS-Curvelet 方法			IHS-TCNONW 方法			IHS-TCNBONW 方法			SRF 方法			本文融合方法		
	R	G	B	R	G	B	R	G	B	R	G	B	R	G	B
BIAS	15.76	16.51	16.21	11.98	11.99	11.99	11.53	11.54	11.54	15.69	16.43	16.22	15.04	15.46	15.32
SD	21.74	22.79	22.52	15.78	15.80	15.80	15.19	15.20	15.20	21.53	22.56	22.33	20.61	21.22	21.08
RASE		3.7435			9.7904			10.1743			3.6435			1.2091	
ERGAS		0.9391			2.8434			2.9503			0.8913			0.3365	
CC	0.9124	0.8681	0.8603	0.9572	0.9304	0.9289	0.9619	0.9371	0.9371	0.9136	0.8694	0.8625	0.9177	0.8768	0.8668
Entropy		7.4359			7.3223			7.3084			7.4465			7.4506	
sCC	0.9438	0.9732	0.9672	0.9252	0.9162	0.9391	0.9388	0.9280	0.9534	0.9533	0.9741	0.9686	0.9548	0.9747	0.9716
FSIM		0.8140			0.8807			0.8885			0.8179			0.8309	

## 参考文献

- [1] Min X, Hao C, Pramod K V. An image fusion approach based on Markov random fields[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(12): 5116 – 5127.
- [2] Qiguang Miao, Baoshu Wang. A novel image fusion method based on WBCT and PCA[J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6(2): 104 – 107.
- [3] Tu T M, Su S C, Shyu H C, Huang P S. A new look at IHS-like image fusion methods[J]. Information Fusion, 2001, 2(3): 177 – 186.
- [4] Chavez P S, Sides S C, Anderson J A. A comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: TM & SPOT pan[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1991, 57(3): 295 – 303.
- [5] Yocky D A. Image merging and data fusion by means of the discrete two-dimensional wavelet transform[J]. Journal of the Optical Society of American A, 1995, 12(9): 1834 – 1841.
- [6] Yun Zhang, Gang Hong. An IHS and wavelet integrated approach to improve pan-sharpening visual quality of natural colour IKONOS and QuickBird images[J]. Information Fusion, 2005, 6(3): 225 – 234.
- [7] Chen S H, Zhang R H, Su H B, et al. SAR and multispectral image fusion using generalized IHS transform based on à trous wavelet and EMD decompositions[J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(3): 737 – 745.
- [8] Zhang W, Yang J Z, Wang X H, et al. The fusion of remote sensing images based on lifting wavelet transformation[J]. Computer Information Science, 2009, 2(1): 69 – 75.
- [9] M Choi, R Y Kim, M R Nam, H O Kim. Fusion of multispectral and panchromatic satellite images using the curvelet transform[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters, 2005, 2(2): 136 – 140.
- [10] 陈超, 秦其明, 池长艳, 蒋洪波, 刘明超. 一种 curvelet 变换和 IHS 变换相结合的遥感图像融合方法[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(4): 444 – 449.  
Chen Chao, Qin Qiming, Chi Changyan, Jiang Hongbo, Liu Mingchao. A remote sensing image fusion method based on curvelet transform and IHS transform[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(4): 444 – 449. (in Chinese)
- [11] 李光鑫, 王珂. 基于 contourlet 变换的彩色图像融合算法[J]. 电子学报, 2007, 35(1): 112 – 117.  
LI Guang-xin, WANG Ke. Color image fusion algorithm using the contourlet transform[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(1): 112 – 117. (in Chinese)
- [12] 贾建, 焦李成, 孙强. 基于非下采样 Contourlet 变换的多传感器图像融合[J]. 电子学报, 2007, 35(10): 1934 – 1938.  
JIA Jian, JIAO Li-cheng, SUN Qiang. The nonsubsampling contourlet transform in multisensor image fusion[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(10): 1934 – 1938. (in Chinese)
- [13] Y Zhao, J Yang, Q Zhang, et al. Hyperspectral imagery super-resolution by sparse representation and spectral regularization

- [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2011, (1), 87:1 – 10.
- [14] Y Zhao, Q Zhang, J Yang. High-resolution multiband polarization epithelial tissue imaging method by sparse representation and fusion[J]. Applied Optics, 2012, 51(4): A27 – A35.
- [15] Kovačević J, Vetterli M. Non-separable multidimensional perfect reconstruction filter bank and wavelet bases for  $\mathbb{R}^n$ [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1992, 38(2): 533 – 555.
- [16] 刘斌, 彭嘉雄. 基于非下采样三通道不可分对称小波的多光谱图像融合[J]. 电子学报, 2011, 39(5): 1094 – 1099. LIU Bin, PENG Jia-xiong. Multi-spectral image fusion method based on nonsubsampling three channels nonseparable symmetrical wavelets[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(5): 1094 – 1099. (in Chinese)
- [17] 刘斌, 彭嘉雄. 基于四通道不可分加性小波的多光谱图像融合[J]. 计算机学报, 2009, 32(2): 350 – 356. Liu Bin, Peng Jiaxiong. Fusion method of multi-spectral and panchromatic image based on four channels non-separable additive wavelets[J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(2): 350 – 356. (in Chinese)
- [18] Liu Bin, Peng Jiaxiong. Multi-spectral image fusion method based on two channels non-separable wavelets[J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2008, 51(12): 2022 – 2032.
- [19] Chen Q H, Micchelli C A, Peng S L, et al. Multivariate filter banks having matrix factorizations[J]. SIAM Journal of Matrix Analysis and Applications, 2003, 25(2): 517 – 531.
- [20] Hong Wang, Zhongliang Jing, Jianxue Li. Image fusion using non-separable wavelet frame [J]. Chinese Optics Letters, 2003, 1(9): 523 – 526.
- [21] Lin Zhang, Lei Zhang, Xuanqin Mou, David Zhang. FSIM: A feature similarity index for image quality assessment[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(8): 2378 – 2386.

#### 作者简介



刘斌男, 1963 年生于湖北红安, 教授、博士生导师. 2006 年在华中科技大学图像所获模式识别与智能系统专业博士学位. 主要从事图像融合、小波理论与应用、模式识别等的教学和研究工作.

E-mail: liubin3318@163.com



祝青女, 1987 年生于武汉, 2008 年于湖北警官学院获得学士学位. 湖北大学数学与计算机科学学院硕士研究生. 主要研究方向为图像处理与模式识别.

E-mail: z\_q\_8758@sina.com